RICHTSTRAHLWERTMESSUNGEN AN HOCHLEISTUNGSELEKTRONENSTRAHLERN VON 125 kV UND 1 mA

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

dem Fachbereich Physik der
Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von

Hans Hoffmann
aus St. Ingbert
1970

RICHTSTRAHLWERTMESSUNGEN AN HOCHLEISTUNGSELEKTRONENSTRAHLERN VON 125 kV UND 1 mA

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

dem Fachbereich Physik
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von
Hans Hoffmann
aus St. Ingbert

1970

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Tag der mündlichen Prüfung: 8. Juli 1970

Dekan: Priv. Doz. Dr. R. Schief

1. Berichterstatter: Prof. Dr. G. Möllenstedt

2. Berichterstatter: Univ. Doz. Dr. H. Seiler

Fotodruck Mikrokopie GmbH, 8 München 22, Bruderstraße 9

Inhaltsangabe

	Seite
1. Einleitung	1
2. Meßverfahren, Meßfehler	3
2.1 Meßverfahren	3
2.2 Meßfehler	9
3. Meßapparatur	11
4. Meßergebnisse, Diskussion	17
4.1 Meßergebnisse	17
4.2 Diskussion	25
5. Zusammenfassung	27
Literaturverzeichnis	28

1. Einleitung

Bei der Materialbearbeitung mit Elektronen werden verschiedene Strahlerzeugungssysteme verwendet. In der vorliegenden Arbeit sind experimentell einige Eigenschaften von 3 ausgewählten Systemen ermittelt worden. Es handelt sich dabei um 2 Systeme nach Rogowski [1] (Abb. 1.1 System RO 1, Abb. 1.2 System RO 2) mit halbkugelförmigem Wehneltzylinder und Anodenrüssel und ein System mit flachem Wehneltzylinder und flacher Anode, ein Siemenssystem (Abb. 1.3 System SIE). Deren wesentliche Kenngrößen sind die Eigenschaften ihres engsten Querschnitts, der als die Ebene der maximalen Stromdichte definiert ist, sowie ihre Richtstrahlwerte.

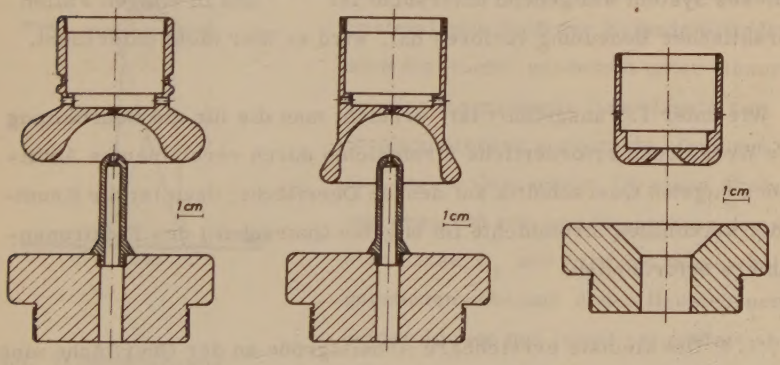


Abb. 1: 1. RO 1 2. RO 2 3. SIE

Im einzelnen erhält man Aussagen über folgende Größen der 3 Elektronenstrahler:

1.1 die axiale Lage des engsten Querschnitts

1.2 die maximale Stromdichte J_{max} im engsten Querschnitt

1.3 die Größe des engsten Querschnitts

1.4 die Strahlerapertur

1.5 den axialen Richtstrahlwert R_{ax}.

Diese Größen sind bei der Materialbearbeitung mit Elektronen aus folgenden Gründen von Bedeutung:

1.1 Der engste Querschnitt eines Systems wird im allgemeinen mit Hilfe von magnetischen Elektronenlinsen verkleinert auf das zu bearbeitende Werkstück abgebildet. Die Dimensionierung dieser Linsen hängt ab von der axialen Lage des engsten Querschnitts und dem gewünschten Arbeitsabstand von der Linse. Bei Verwendung des Fernfokussystems nach Steigerwald [2] entfällt die Notwendigkeit, Linsen benutzen zu müssen. Da dieses System weitgehend untersucht ist [3, 4] und in einigen Fällen an praktischer Bedeutung verloren hat, wird es hier nicht untersucht.

1.2 Wie unter 1.1 ausgeführt ist, erreicht man die für die Bearbeitung eines Werkstücks erforderliche Stromdichte durch verkleinertes Abbilden des engsten Querschnitts auf dessen Oberfläche; dazu ist die Kenntnis der maximalen Stromdichte im engsten Querschnitt des Elektronenstrahlers erforderlich.

1.3 , 1.4 Die kleinste erreichbare Arbeitsgröße an der Oberfläche eines Werkstücks hängt einmal ab von der Größe des engsten Querschnitts und zum anderen von dessen Verbreiterung durch den Öffnungsfehler der Magnetlinse, welche die unter einer bestimmten Apertur aus dem engsten Querschnitt austretenden Elektronen auf das Werkstück fokussiert.

1.5 Die Kenntnis des axialen Richtstrahlwerts erlaubt einen Vergleich der Qualität verschiedener Elektronenstrahler.

2. Meßverfahren, Meßfehler

2.1 Meßverfahren

Zur Bestimmung der unter 1.1 bis 1.3 angegebenen Meßgrößen wird der engste Querschnitt EQ mit Hilfe von 2 Magnetlinsen in die Bildebene BE abgebildet. Der dabei verwendete Strahlengang ist in Abb. 2 angegeben, jedoch ist darin der Maßstab senkrecht zur optischen Achse zu dem auf der optischen Achse um den Faktor 250 gedehnt. Der engste Querschnitt EQ der 3 untersuchten Elektronenstrahler liegt bei allen Betriebsbedingungen in der Nähe der Kathode. In einem Abstand von 30 bis 60 mm (je nach System) unterhalb der Kathode befindet sich die Anode; wiederum unter dieser ist eine magnetische Doppelspule zur Strahljustierung angebracht. Dadurch hat der engste Querschnitt EQ einen Abstand von etwa 150 mm zur Hauptebene der ersten Linse L_1 und wird von dieser bei gegebenem Abstand d der Hauptebenen beider Linsen nur leicht vergrößert abgebildet. Dieses Zwischenbild des engsten Querschnitts wird durch die Linse L_2 10 bis 15fach vergrößert in die Ebene BE abgebildet; dort befindet sich der Faradaykäfig FK zur Messung der Elektronenströme.

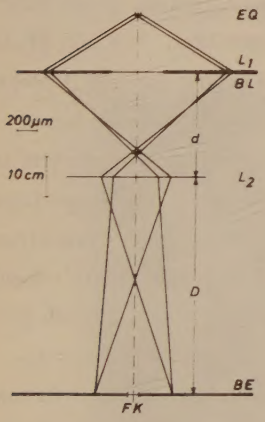


Abb. 2: Strahlengang

2.1.1 Die axiale Lage des engsten Querschnitts läßt sich berechnen, da die Abstände der Bildebenen zu den Hauptebenen der identischen

Linsen und deren Brennweiten bekannt sind. Diese werden Eichkurven entnommen (Abb. 3), welche die Abhängigkeit der Brennweiten f in mm vom Strom I_L in mA des Versorgungsgeräts angeben; Parameter in Abb. 3 sind die Beschleunigungsspannungen der Elektronen von 50, 75, 100 und 125 kV. Zur Ermittlung der Eichkurven in Abb. 3 wird ein Fadenkreuz in verschiedenen Abständen vor der Magnetlinse angebracht und jeweils auf einen Leuchtschirm in der Bildebene abgebildet. Aus den Abständen von Fadenkreuz und Bildebene von der Hauptebene der Linse wird die jeweilige Brennweite berechnet und gegen den jeweiligen Linsenstrom aufgetragen. Dabei wird angenommen, daß die Magnetlinse als schwache Linse betrieben wird, das heißt, daß die Symmetrieebene der Polschuhe als Hauptebene angenommen wird. Dies ist dadurch gerechtfertigt, daß der von Glaser [5] eingeführte Linsenstärkeparameter k^2 stets kleiner als 0,2 ist. Dies entspricht einer kleinsten Brennweite von 40 mm bei einer Strahlspannung von 125 kV. Die so erhaltenen Eichkurven wurden mit den theoretisch von Liebmann und Grad [6] ermittelten Kurven verglichen, es ergaben sich kleine systematische Abweichungen, die nach v. Borries, Lenz und Opfer [7] als Remanenzerscheinungen der Polschuhe gedeutet werden können. Im folgenden werden die experimentell ermittelten Kurven zugrunde gelegt.

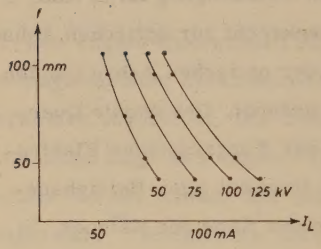


Abb. 3: Eichkurven

2.1.2 Ist die axiale Lage des engsten Querschnitts bekannt, so lassen sich daraus die Vergrößerungen V_1 und V_2 der Linsen L_1 und L_2 und die Gesamtvergrößerung $V = V_1 \cdot V_2$ berechnen. Um die maximale

Stromdichte J_{max} im engsten Querschnitt zu bestimmen, wird die Vergrößerung V möglichst groß gewählt, so daß das Bild des vergrößerten engsten Querschnitts groß ist gegen die Meßblende des Faradaykäfigs FK. Der gemessene Strom geteilt durch die Fläche der Meßblende ergibt demnach die maximale Stromdichte in der Bildebene, diese wird mit Hilfe der Vergrößerung V in die maximale Stromdichte J_{max} im engsten Querschnitt umgerechnet.

2.1.3 Unterhalb der zweiten Magnetlinse L_2 befindet sich eine magnetische Ablenkspule, die mit einem sägezahnförmigen Signal angesteuert wird. Dadurch wird das Bild des engsten Querschnitts periodisch über

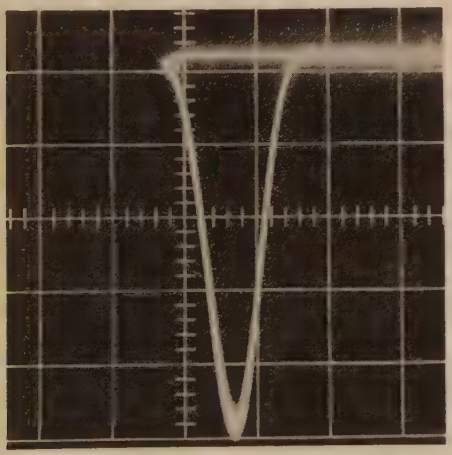


Abb. 4: Beispiel einer Stromdichteverteilung

die Faradaykäfigblende gelenkt; der abgeleitete Käfigstrom wird oszillografiert. Auf dem Oszillografenbildschirm erscheint demnach die Stromdichteverteilung des Bildes des engsten Querschnitts. Ein Beispiel dafür

zeigt Abb. 4 für das System RO 1 bei einer Strahlspannung von 100 kV. Als Maß für die Größe des engsten Querschnitts wird die durch die Vergrößerung geteilte Zehntelwertsbreite der oszillografierten Stromdichteverteilung angenommen. Deren wahre Größe erhält man durch eine Eichung, indem man den Faradaykäfig um einen definierten Betrag verschiebt und die dazugehörige Verschiebung der Stromdichteverteilung auf dem Oszillografenbildschirm mißt.

2.1.4 Zur Bestimmung der Strahleraperturen der verschiedenen Systeme baut man die beiden Magnetlinsen aus der elektronenoptischen Säule aus, so daß sich über der magnetischen Ablenkspule unmittelbar der Strahlkopf anschließt. Wie unter 2.1.3 beschrieben, wird die Zehntelwertsbreite des Elektronenstrahls in der Bildebene bestimmt. Aus dieser Größe, der aus 2.1.1 bekannten axialen Lage und der aus 2.1.3 bekannten Größe des engsten Querschnitts wird der Halbwinkel der Strahlerapertur berechnet.

2.1.5 Der Richtstrahlwert R eines Elektronenstrahlers ist nach v. Borries und Ruska [8] definiert als der Strom I, der durch eine Fläche F in den Raumwinkel ω tritt

$$(1) \qquad R = \frac{I}{F \cdot \omega}$$

Die Meßvorschrift für den Richtstrahlwert R ergibt sich aus der Definitionsgleichung (1), wenn man Abbildungsfehler vernachlässigen kann. Nach Lenz [9] ist es dabei unbefriedigend, daß die Definition bzw. Meßvorschrift eine gewisse Willkür bei der Auswahl der Fläche F und des Raumwinkels ω enthält. Die Verteilung der Stromdichte sowohl über den engsten Querschnitt als auch über den Raumwinkel sind kontinuierliche Funktionen, so daß Lenz in Erweiterung des Begriffes des Richt-

strahlwerts den der Richtstrahlfunktion eingeführt hat

$$(2) \quad R(x, y, x', y') = \frac{dI}{dx\, dy\, dx'\, dy'} = \frac{dI}{dF \cdot d\omega}$$

Dabei ist dI der Strom, der durch ein Flächenelement dx dy in das Raumwinkelelement dx'dy' tritt. Den in (1) definierten Richtstrahlwert erhält man als Mittelwert

$$(3) \quad R = \frac{1}{F \cdot \omega} \int_F \int_\omega R(x, y, x', y')\, dx\, dy\, dx'\, dy'$$

und den axialen Richtstrahlwert

$$(4) \quad R_{ax} = R(0, 0, 0, 0)$$

als Grenzwert für $F \to 0$, $\omega \to 0$.

Bei der Messung des axialen Richtstrahlwerts müssen diese Bedingungen gut angenähert werden. Dazu wurden zwei Verfahren gewählt:

2.1.5.1 Durch Einbringen einer Blende BL in die Hauptebene der Linse L_1 (Abb. 2) wird eine geeignete Apertur vorgegeben.

2.1.5.2 Nach einem Vorschlag von Ruska [10] wird das Zweiblenden-Verfahren angewendet.
Beide Verfahren sollen im folgenden näher erläutert werden.

2.1.5.1 Nach der Messung der Größen unter 2.1.1 bis 2.1.3 kann ohne Brechen des Vakuums bei gleichem Aufbau der elektronenoptischen Säule eine genügend enge Blende BL in die Hauptebene der Linse L_1 eingefahren werden, welche in Abb. 2 durch den ausgezogenen Teil der Hauptebene angedeutet ist. Man bestimmt erneut wie unter 2.1.2 die auf den engsten Querschnitt bezogene Stromdichte. Teilt man diese durch den von der Blende BL vorgegebenen Raumwinkel, so erhält

man ein Maß für den axialen Richtstrahlwert. Da sich bei diesem Verfahren die erwähnte Blende im Feld der Linse L_1 befand, erwartet man zu hohe Meßwerte für den axialen Richtstrahlwert. Ferner sind, wie unter 2.2.5.1 ausgeführt wird, die absoluten Meßfehler groß.

2.1.5.2 Daher werden die axialen Richtstrahlwerte nach dem Zweiblenden-Verfahren gemessen. Durch zwei enge Blendenlöcher blendet man einen axialen Stromfaden aus; dessen Strom I_{mess} wird hinter der zweiten Blende gemessen und daraus die Stromdichte in dieser Blende berechnet. Die erste Blende gibt bei hinreichender Ausleuchtung einen Raumwinkel $\omega = \pi\alpha^2$ vor. Aus beiden Größen läßt sich der axiale Richtstrahlwert R_{ax} berechnen:

$$(5) \qquad R_{ax} = I_{mess}\left(\frac{L}{\pi\, r_1 r_2}\right)^2$$

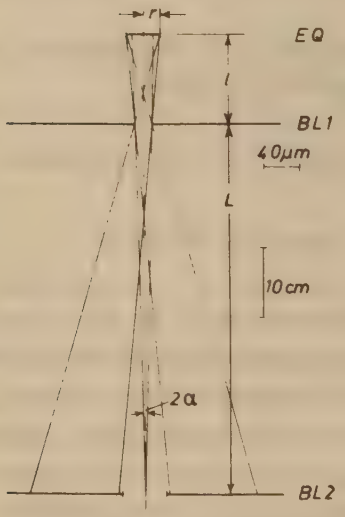


Abb. 5: Zweiblendenverfahren

Dabei sind r_1 und r_2 die Radien der beiden Blenden und L ihr Abstand voneinander. Die Ausleuchtbedingung ist erfüllt, wenn die erste Blende BL 1 (Abb. 5) von jedem Flächenelement der zweiten Blende BL 2 aus betrachtet voll ausgeleuchtet erscheint. Dies ist gegeben durch die Bedingung für den Radius r_1 der ersten Blende

$$(6) \qquad r_1 \leq \frac{rL - r_2 l}{l + L}$$

Dabei ist l der Abstand der ersten Blende vom engsten Querschnitt EQ und r dessen Halbmesser (Abb. 5). Diese beiden Größen wurden unter 2.1.1 und 2.1.3 bestimmt, die

Größen r_2 und L werden geeignet gewählt.

2.2 Meßfehler

Bei der Messung der unter 2.1.1 bis 2.1.3 und 2.1.5.1 angegebenen Größen gehen als wesentliche Fehler diejenigen bei der Bestimmung der Linsenbrennweiten ein, die in Form von Eichkurven in Abb. 3 dargestellt sind. Zu ihrer Ermittlung wurde der in 2.1.1 beschriebene Vorgang mindestens 5 mal wiederholt. Die mittlere quadratische Abweichung vom Mittelwert betrug durchschnittlich 3 %, der Linsenstrom wurde mit einem Instrument der Güteklasse 1 gemessen. Mithin wird ein Gesamtfehler der Brennweitenmessung von 4 % angenommen. Aus der Abhängigkeit der zu bestimmenden Größen von den gemessenen Werten der Brennweiten f_1 und f_2 der Linsen L_1 und L_2 (Abb. 2) ergeben sich folgende absolute Meßfehler:

2.2.1 Bei der Messung der axialen Lage des engsten Querschnitts 8 %.

2.2.2 Bei der Messung der maximalen Stromdichte im engsten Querschnitt 36 %, der sich aus folgenden Anteilen zusammensetzt: Bestimmung der Meßblendenfläche 2 %, Güteklasse des Strommeßinstruments 1, Bestimmung der Vergrößerung 13 %, des Quadrats der Vergrößerung 26 %; dazu kommt ein Anteil von etwa 7 %, der durch den Öffnungsfehler der ersten Linse verursacht wird. Der Einfluß des Öffnungsfehlers der zweiten Linse kann vernachlässigt werden.

2.2.3 Bei der Messung der Zehntelwertsbreite des engsten Querschnitts 33 %; zusammengesetzt aus dem Fehler der Vergrößerung (13 %) und der Ungenauigkeit bei der Eichung und Ablesung des Signals auf dem Oszillografenbildschirm (20 %).

2.2.4 Bei der Messung der Strahlerapertur 28 %, bestehend aus dem zweiten Anteil unter 2.2.3 (20 %) und dem Anteil von 8 % nach 2.2.1.

2.2.5.1 Bei der Messung des axialen Richtstrahlwerts durch Abbilden des engsten Querschnitts 58 %, zusammengesetzt aus dem Anteil der Stromdichte 36 % wie unter 2.2.1 und dem Anteil bei der Bestimmung des Raumwinkels von 22 %.

2.2.5.2 Bei der Messung des axialen Richtstrahlwerts nach dem Zweiblenden-Verfahren 15 %; darin gehen wesentlich nur die Fehler bei der Messung der Blendenflächen ein.

Allerdings sind bei allen gemessenen Größen die relativen Abweichungen der Meßwerte untereinander geringer, da jeweils die gleichen gemittelten Werte der Eichkurven (Abb. 3) verwendet wurden.

3. Meßapparatur

Der elektronenoptische Versuchsstand wurde aus Einzelteilen aufgebaut, die von der Firma C. Zeiss, Oberkochen, bei der Entwicklung ihrer Elektronenstrahl-Schweißmaschine ES 1002 als Vorserienbauteile gefertigt wurden. Diese wurden instandgesetzt und teilweise umgebaut. Abb. 6 zeigt einen Schnitt durch die elektronenoptische Säule, wie sie zur Messung der Größen 2.1.1 bis 2.1.3 verwendet wurde.

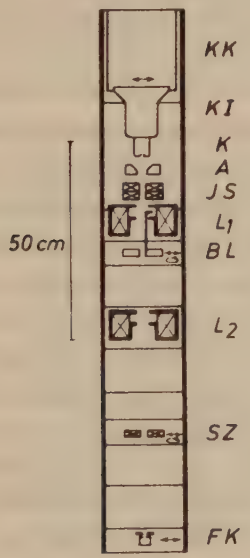


Abb. 6: Elektronenoptische Säule

3.1.1 Das Betriebsvakuum im Kathodenraum betrug $5 \cdot 10^{-5}$ Torr; es wurde mit Hilfe einer wassergekühlten Öldiffusionspumpe Diff 650 der Firma Balzers und einer zweistufigen rotierenden Vorpumpe RZ - 12 der Firma Brand erreicht.

3.1.2 Wie in Abb. 6 angedeutet ist, besteht die elektronenoptische Säule aus durch Überwurfringe miteinander verschraubbaren Gehäuseteilen, welche die einzelnen elektronenoptischen Bauteile enthalten. Zum Schutz gegen austretende Röntgenstrahlung sind die meisten Gehäuse innen mit Blei ausgekleidet und durch mit Blei ausgegossene Ringe gegeneinander zentriert. Die Linsengehäuse sind durch äußere Bleimäntel, Drehdurchführungen durch Bleikappen und Einblickfenster durch doppeltes Bleiglas abgeschirmt. Die mit einem Röntgendosimeter gemessene Strahlungsleistung außerhalb der Säule lag höchstens bei der Hälfte der zulässigen Grenze von 2,5 mrem pro Stunde.

3.1.3 Die Kathode K ist gegenüber der Anode A mechanisch in den zur optischen Achse senkrechten Richtungen um jeweils 5 mm verschiebbar, wie in Abb. 6 angedeutet ist. Der Kathodenkopf KK, der das Hochspannungskabel aufnimmt, ist zur Erhöhung der Spannungsfestigkeit mit etwa einem Liter Siliconöl AK 100 der Firma Wacker - Chemie gefüllt. Infolge der unvermeidbaren Leckraten der Dichtungen des ölgefüllten Kathodenkopfes gegen den evakuierten Kathodenraum schlagen sich auch kurz nach jeder Reinigung Ölfilme am oberen Ende des Kathodenisolators KI nieder. Diese verursachen bei hohen Betriebsspannungen Gasentladungen, dadurch treten Blindströme bis zu 50 µA auf.

Unterhalb der fest eingebauten Anode A sind zur magnetischen Strahljustierung zwei in Gießharz eingebettete Doppelspulen JS angeordnet.

3.1.4 Als Kathoden wurden bei allen Messungen Haarnadelkathoden aus Wolfram mit einer Drahtstärke von 0,25 mm verwendet. Mittels einer Justiervorrichtung werden die Kathoden zentriert und in ihrer Höhe so justiert, daß ihre Vorderkanten 0,3 mm hinter die vordere Ebene der Wehneltbohrung zurückgezogen sind. Die Temperatur T_W der emittierenden Vorderfläche der Kathoden wurde nach Entfernen

des Wehneltzylinders mit einem Mikropyrometer der Firma Pyro-Werk GmbH. gemessen. Dessen Anzeige T_S ist auf die Temperatur des schwarzen Strahlers geeicht und wird für Wolfram gemäß [11]

$$(7) \quad \frac{1}{T_W} = \frac{1}{T_S} - 3{,}92 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^oK} \quad \text{umgerechnet.}$$

Durch eine Korrektur wird die Reflexion und Absorption des Einblickfensters und der Vorsatzlinse des Mikropyrometers berücksichtigt. Bei allen Versuchen betrug die Kathodentemperatur $T_W = (2700 \pm 20)^oK$. Dabei hatten die Kathoden eine Lebensdauer von etwa 6 Stunden.

In einem weiteren Versuch wurde die Kathodentemperatur bei dem höchstmöglichen Strahlstrom von 1 mA gemessen. Dazu wurde unterhalb der Anode ein Spiegel angebracht, der es gestattete, die Kathodentemperatur durch die Anodenbohrung hindurch zu messen. Es ergab sich keine meßbare Temperaturänderung im Betrieb ohne und mit 1 mA Strahlstrom.

Unter bestimmten Bedingungen wachsen an der Oberfläche von Kathoden Wolfram - Whisker. Abb. 6 zeigt Aufnahmen aus dem Elektronenrastermikroskop Stereoscan von 2 verschiedenen Whiskern an der Spitze einer Kathodenhaarnadel nach etwa 5 Stunden Betriebszeit. Es muß angenommen werden, daß diese Whisker emittieren und daher einen Einfluß auf den engsten Querschnitt haben. Es wurde beobachtet, daß sich die Lage und die Stromdichte des engsten Querschnitts nach Hochspannungsüberschlägen verändert hatte. Dies kann dadurch gedeutet werden, daß Hochspannungsüberschläge Whisker zerstören. Diese brechen leicht ab von der Kathodenoberfläche, wie bei der Präparation von gebrauchten Kathoden zur Untersuchung im Elektronenrastermikroskop festgestellt wurde. Meßreihen, bei denen der erwähnte Effekt auftrat, wurden abgebrochen und mit neuen Kathoden wiederholt.

Abb. 7.1 und 7.2: Wolfram-Whisker

3.1.5 Die magnetischen Linsen L_1 und L_2 sind identisch, ihre Polschuhe haben eine Bohrung von 30 mm Durchmesser und einen Abstand von 25 mm. Die magnetischen Spulen haben 16 000 Windungen und sind mittels Gießharz in den Linsenkörper eingebettet. Die Linsen sind fest

in den Gehäusen eingebaut. Sie werden durch zwei auf 10^{-4} stromstabilisierte Netzgeräte gespeist, deren Ströme von 30 mA bis 150 mA kontinuierlich regelbar sind.

3.1.6 Die Blende BL und die Ablenkspule für den Sägezahn SZ in Abb. 6 sind auf identischen, drehbaren Verschiebetischen montiert, der Faradaykäfig FK ist auf einem wassergekühlten Verschiebetisch angeschraubt. Die Meßblende des Faradaykäfigs bestand bei der Bestimmung der Größen 2.1.1 bis 2.1.4 und 2.1.5.1 aus einer Wolframscheibe mit einer Dicke von 1 mm, einem Durchmesser von 10 mm und einer Bohrung von 0,1 mm Durchmesser. Zur Vorgabe der Apertur bei der Messung des Richtstrahlwerts nach 2.1.5.1 wurden ebenfalls Wolframscheiben derselben Abmessungen, jedoch mit Bohrungsdurchmessern von 0,5 und 0,25 mm eingesetzt. Diese Scheiben wurden bei der Messung des Richtstrahlwerts nach dem Zweiblenden-Verfahren (2.1.5.2) als Vorblenden verwendet; als Hauptblenden wurden Aperturblenden des Siemens Elmiskops mit Bohrungsdurchmessern von 20 und 50 µm benutzt. Nach jeder Meßreihe wurden die Bohrungsdurchmesser dieser Blenden in einem Meßmikroskop nachgeprüft.

3.2.1 Als Hochspannungsquelle dient eine Hochspannungsanlage HA 300 der Firma Carl Zeiss, Oberkochen. Zum Schutz ihres Kaskadenteils gegen Überschläge ist darauf eine Luftspule von 2000 Windungen angebracht. Das Absprühen von Ladungen von dieser Spule trägt ebenfalls zu dem unter 3.1.3 erwähnten Blindstrom bei.

3.2.2 Heizstrom und Wehneltspannung werden durch ein Hilfsspannungsgerät erzeugt; es lassen sich Heizströme bis zu 8 A und eine auf 10^{-3} geglättete negative Wehneltspannung von bis zu 2400 Volt einstellen.

3.2.3 Die Spule zur Strahlablenkung SZ (Abb. 6) wird mit einem sägezahnförmigen Strom gespeist, dessen Frequenz von 50 bis 500 Hz variiert werden kann. Meist wurde die Frequenz von 500 Hz gewählt. Die Grenzfrequenz des Registrierkreises von Faradaykäfig und Ableitwiderstand betrug 69 kHz.

3.2.4 Der Faradaykäfig bestand aus einem V2A-Zylinder mit einem Innendurchmesser von 5 mm und einer Länge von 40 mm. Der Isolationswiderstand betrug etwa $10^{12}\,\Omega$. Zur Kontrolle, ob die Strommessung nicht durch Sekundärelektronen oder durch von Röntgenstrahlen ausgelösten Elektronen zu hoch ausfiele, wurde in einigen Fällen der Faradaykäfig auf ein negatives Potential von 50 Volt gelegt. Es ergab sich keine Änderung des gemessenen Stroms.

4. Meßergebnisse, Diskussion

4.1 In den folgenden Tabellen und Diagrammen sind die Meßergebnisse zusammengefaßt. Alle gemessenen Größen sind angegeben in Abhängigkeit vom Strahlstrom, der von 0,1 bis 1 mA variiert wurde, und von der Beschleunigungsspannung, die 50, 75, 100 und 125 kV betrug. Dabei ist jeder angegebene Meßwert der Mittelwert aus mindestens 5 Messungen.

4.1.1 Abb. 8 zeigt die gemessenen Werte der axialen Lage des engsten Querschnitts in mm. Dabei ist die Vorderkante der Kathode als Nullpunkt der optischen Achse angesetzt. Positive Werte in den Tabellen der Abb. 8 bedeuten reelle, negative Werte bedeuten virtuelle engste Querschnitte.
Die Systeme RO 1 und RO 2 verhalten sich im Rahmen der Meßgenauigkeit identisch. Der in 2.2.1 angegebene absolute Fehler von 8 % (et-

U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
50	-3	+1	+2	+3	+3
75	-3	-2	-1	-1	-1
100	-18	-16	-16	-15	-14
125	-15	-12	-11	-10	-8

RO 1

U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
50	+1	+2	+4	+5	+5
75	-6	-5	-3	-2	-1
100	-15	-13	-11	-10	-11
125	-6	-6	-4	-4	-4

RO 2

U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
75	-10	-6	+4	+5	+10
100	-5	-2	-1	+4	+8
125	-17	-14	-7	-3	-1

SIE

Abb. 8: Axiale Lage des engsten Querschnitts in mm

wa $\pm$ 12 mm) bezieht sich auf die axiale Lage des engsten Querschnitts, gemessen von der Hauptebene der Linse L_1 (Abb. 2) aus. Dagegen beziehen sich die in Abb. 8 angegebenen Werte auf die Lage der Kathode. Die relativen Abweichungen der Meßwerte untereinander betragen höchstens 5 mm. Man erkennt aus Abb. 8 ein Wandern des engsten Querschnitts in positive Richtung bei Erhöhen des Strahlstroms und in negative Richtung bei Erhöhen der Strahlspannung bis 100 kV. Bei 125 kV wandern die engsten Querschnitte wieder in positive Richtung, bleiben jedoch virtuell.

Für das Siemenssystem konnten keine Messungen bei 50 kV durchgeführt werden, da die Registriergenauigkeit der Anordnung nicht ausreichte. Sie war für Strahlströme von 0,1 mA bei höheren Spannungen gerade erreicht, es ergaben sich hohe relative Abweichungen von 10 mm der Meßwerte untereinander. Die übrigen Meßwerte zeigen ein ähnliches Verhalten des Siemenssystems wie die Rogowskisysteme.

4.1.2 Die gemessenen maximalen Stromdichten J_{max} in $\frac{A}{cm^2}$ sind in

U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
50	4	13	15	25	28
75	11	31	46	54	79
100	10	33	49	83	108
125	15	51	92	140	177

RO 1

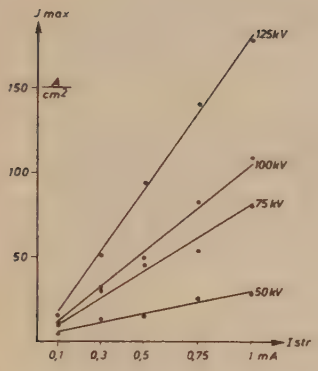
U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
50	6	16	27	39	45
75	7	24	41	59	79
100	9	27	53	81	94
125	13	42	76	112	156

RO 2

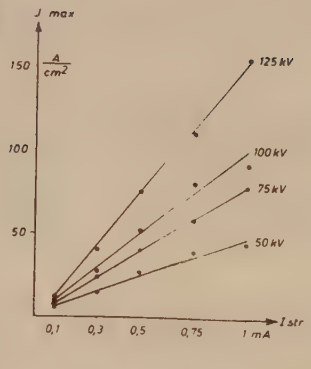
U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
75	1,6	5,0	11,4	16,6	25,7
100	2,0	7,0	11,1	21,0	28,8
125	2,0	5,5	13,6	24,5	33,0

SIE

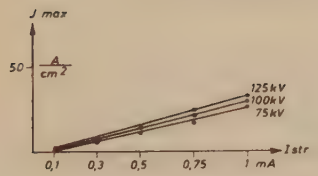
Abb. 9: Maximale Stromdichte J_{max} $\frac{A}{cm^2}$ im engsten Querschnitt



RO 1



RO 2



SIE

Abb. 10: Maximale Stromdichte im engsten Querschnitt

den Tabellen der Abb. 9 und in den Diagrammen der Abb. 10 zusammengestellt. Die Werte der beiden Rogowskisysteme stimmen im Rahmen der Meßgenauigkeit überein, sie sind etwa 4 mal so groß wie die Werte des Siemenssystems.

4.1.3 In Abb. 11 sind die Zehntelwertsbreiten der engsten Querschnitte in µm der 3 Systeme angegeben. Bei allen Systemen bleiben die Größen der engsten Querschnitte über den gesamten Meßbereich in

U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
50	71	73	69	70	75
75	54	57	60	54	56
100	63	64	64	69	64
125	59	54	55	55	51

RO 1

U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
50	67	68	71	70	77
75	62	65	62	64	61
100	62	63	53	54	54
125	52	49	46	47	45

RO 2

U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
75	169	139	114	121	110
100	110	92	92	84	86
125	122	116	92	91	83

SIE

Abb. 11: Zehntelwertsbreiten des engsten Querschnitts in µm

etwa konstant.

Es muß wiederholt werden, daß die Messungen für kleine Strahlströme bei dem Siemenssystem an der Grenze der Registriergenauigkeit lagen; die Abweichungen dieser Meßwerte untereinander betrugen bis zu 50 µm, im Gegensatz zu den Abweichunngen der Meßwerte der sich identisch verhaltenden Rogowskisysteme von 10 µm. Von dieser Einschränkung abgesehen, liegen die Größen der engsten Querschnitte des Siemenssystems etwa doppelt so hoch wie die der Rogowskisysteme.

4.1.4 Aus Abb. 12 ist zu entnehmen, daß die in 10^{-3} rad angegebenen Halbwinkel der Strahleraperturen bei allen Systemen im Rahmen der Meßgenauigkeit gleich sind. Sie nehmen mit steigendem Strahlstrom zu und nehmen mit steigender Strahlspannung ab.

U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
50	5,2	6,4	6,7	6,7	7,0
75	4,6	6,1	6,9	7,1	7,1
100	4,0	5,4	6,3	6,7	6,9
125	3,3	4,3	4,8	5,2	5,5

RO 1

U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
50	5,6	6,8	6,8	6,8	6,4
75	4,7	5,7	6,1	6,4	6,4
100	3,8	5,0	5,9	6,2	6,2
125	3,7	5,0	5,8	6,4	6,4

RO 2

U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
75	4,2	4,9	6,2	6,8	7,4
100	3,2	4,7	5,0	6,2	6,5
125	2,5	3,4	4,4	4,9	5,4

SIE

Abb. 12: Halbwinkel der Strahlerapertur in 10^{-3} rad

U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
50	1,6	3,0	4,6	6,8	7,1
75	4,0	7,4	9,1	11,4	17,0
100	4,9	9,1	12,1	15,8	20,5
125	6,5	13,9	17,1	24,4	27,5

RO 1

U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
50	1,8	3,3	4,9	6,1	7,4
75	3,3	6,1	8,6	10,3	13,7
100	5,1	9,4	11,5	17,7	19,2
125	7,2	16,1	21,6	29,0	33,0

RO 2

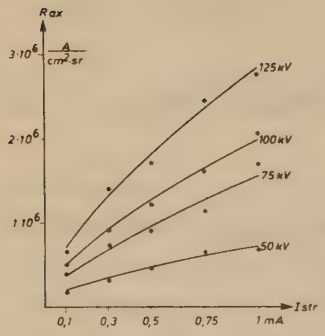
U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
75	1,0	1,7	2,4	2,9	3,5
100	1,5	2,5	3,3	4,1	4,9
125	2,0	3,5	5,8	7,0	8,3

SIE

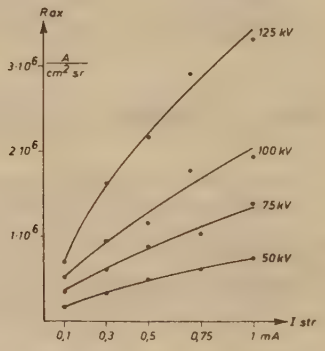
Abb. 13: Axiale Richtstrahlwerte in $10^5 \frac{A}{cm^2 sr}$

4.1.5.1 Abb. 13 und Abb. 14 zeigen tabellarisch und grafisch die Meßwerte der axialen Richtstrahlwerte, welche mit der Methode der Abbildung des engsten Querschnitts ermittelt wurden. Die Zahlenwerte der Abb. 13 geben R_{ax} in $10^5 \frac{A}{cm^2 \, sr}$ an.

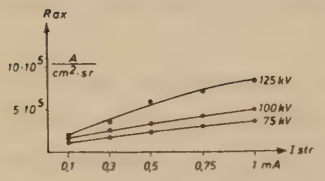
Die Richtstrahlwerte der Rogowskisysteme stimmen weitgehend überein, sie sind etwa viermal so groß wie die Richtstrahlwerte des Siemenssystems.



RO 1



RO 2



SIE

Abb. 14: Axiale Richtstrahlwerte

4.1.5.2 Abb. 15 und Abb. 16 stellen die nach dem Zweiblenden-Verfahren gemessenen axialen Richtstrahlwerte tabellarisch und grafisch dar. Die Zahlenwerte der Abb. 15 geben R_{ax} in $10^5 \frac{A}{cm^2 sr}$ an. Sie stimmen für die Rogowskisysteme gut überein und liegen etwa um ein Dreifaches über Werten des Siemenssystems.

U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
50	0,9	1,9	3,0	3,7	4,3
75	1,6	3,3	4,8	6,8	7,4
100	2,5	4,7	6,8	9,4	11,9
125	3,8	6,7	9,1	11,9	14,8

RO 1

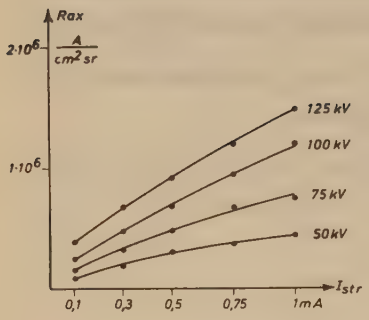
U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
50	1,0	1,8	2,7	3,5	4,1
75	1,5	3,1	4,6	5,8	7,1
100	2,5	4,7	6,7	9,7	12,2
125	3,6	6,6	9,0	11,7	14,5

RO 2

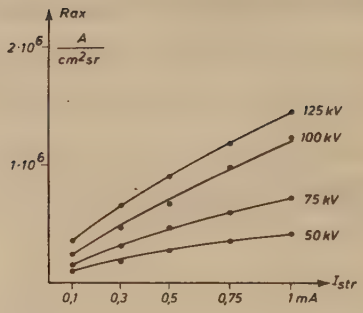
U in kV	Strahlstrom in mA 0,1	0,3	0,5	0,75	1
50	0,3	0,6	0,8	1,0	1,2
75	0,6	1,2	1,6	2,1	2,5
100	0,9	1,8	2,5	3,1	3,7
125	1,4	2,9	3,9	4,8	5,5

SIE

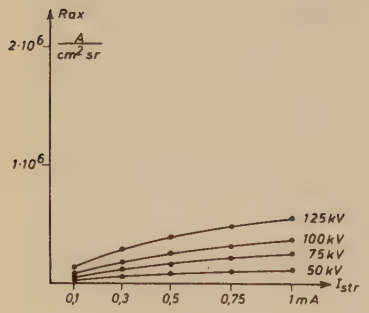
Abb. 15: Axiale Richtstrahlwerte in $10^5 \frac{A}{cm^2 sr}$



RO 1



RO 2



SIE

Abb. 16: Axiale Richtstrahlwerte

4.2 Diskussion

Messungen der spezifischen Daten von Elektronenstrahlern der genannten Arten sind lediglich von Scheffels [12] bekannt. In seiner Arbeit wird berichtet über Messungen an Rogowskisystemen mit Kugelkathoden und an Siemenssystemen mit Bandkathoden bei Temperaturen von $2770^{\circ}K$, bei Strahlströmen von 1 bis 20 mA bzw. 1 bis 75 mA und bei Strahlspannungen von 140 kV und 150 kV. Diese Ergebnisse lassen sich daher mit denen der vorliegenden Arbeit nicht vergleichen. Scheffels hat Richtstrahlwerte angegeben, die über die Halbwertsbreite der Stromdichteverteilung gemittelt sind. Diese gemittelten Richtstrahlwerte sind kleiner als die axialen Richtstrahlwerte. Scheffels erhielt Richtstrahlwerte bis zu $10^6 \frac{A}{cm^2 \cdot sr}$ für ein Rogowskisystem bei einer Strahlspannung von 140 kV und bis zu $4 \cdot 10^6 \frac{A}{cm^2 \cdot sr}$ für ein Siemenssystem bei einer Strahlspannung von 150 kV.

Es muß darauf verwiesen werden, daß die in der vorliegenden Arbeit gemessenen axialen Richtstrahlwerte ebenso wie die von Scheffels angegebenen mittleren Richtstrahlwerte erheblich größer sind, als nach Langmuir [13] möglich sein sollte. Danach beträgt der maximal mögliche Richtstrahlwert

$$(7) \qquad R_{Th} = \frac{j_s}{\pi} \cdot \frac{e\,U}{k\,T}$$

Dabei ist e die Elementarladung, k die Boltzmannkonstante, U die Strahlspannung, T die absolute Temperatur der Kathode und j_s die Sättigungsstromdichte nach Richardson-Dushman

$$(8) \qquad j_s = A\,T^2\,e^{-\phi/kT}$$

Dabei ist A eine Konstante und ϕ die Austrittsarbeit der Elektronen. Setzt man nach Herring und Nichols [14] für Wolfram $A = 75 \frac{A}{cm^2 (^{\circ}K)^2}$

und $\Phi = 4,5$ eV, so erhält man bei einer Temperatur von 2700°K z. B. für eine Strahlspannung von 100 kV einen theoretischen Richtstrahlwert von

$$R_{TH} = 2,6 \cdot 10^5 \frac{A}{cm^2 \cdot sr}$$

Obwohl die Systeme in Raumladung betrieben wurden, sind mit Hilfe des Zweiblenden-Verfahrens (2.1.5.2) bei einer Strahlspannung von 100 kV axiale Richtstrahlwerte von $1,2 \cdot 10^6 \frac{A}{cm^2 \cdot sr}$ für die Rogowskisysteme und von $3,7 \cdot 10^5 \frac{A}{cm^2 \cdot sr}$ für das Siemenssystem gemessen worden. Eine Erklärung für die Differenz zwischen Theorie und Experiment kann bis jetzt noch nicht gegeben werden.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit sind die Eigenschaften von drei Elektronenstrahlern gemessen worden. Es handelt sich um 2 Systeme mit halbkugelförmigem Wehneltzylinder und Anodenrüssel (Rogowskisysteme) und ein System mit flachem Wehneltzylinder und flacher Anode (Siemenssystem). Außer den Eigenschaften der engsten Querschnitte der Systeme werden die axialen Richtstrahlwerte gemessen in einem Bereich von 0,1 bis 1 mA für den Strahlstrom und bei Strahlspannungen von 50, 75, 100 und 125 kV. Man erhält Aussagen über die axiale Lage und die Größe der engsten Querschnitte, über die maximale Stromdichte im engsten Querschnitt, über dessen Strahleraperturen sowie die axialen Richtstrahlwerte der Systeme. Die Rogowskisysteme unterscheiden sich stark von dem Siemenssystem, ihre maximalen Stromdichten sind um ein Vierfaches größer, die Durchmesser ihrer engsten Querschnitte halb so groß wie die des Siemenssystems. Es werden axiale Richtstrahlwerte bis zu $1,5 \cdot 10^6 \frac{A}{cm^2 \cdot sr}$ für die Rogowskisysteme bei einer Strahlspannung von 125 kV gemessen. Dieser Wert liegt um den Faktor 5 über der theoretischen Grenze der Richtstrahlwerte nach Langmuir. Eine Erklärung für die Differenz zwischen Theorie und Experiment kann bis jetzt noch nicht gegeben werden.

Herrn Professor Dr. Ing. habil. G. Möllenstedt danke ich für die Anregung und stete Förderung der Arbeit.

Literaturverzeichnis

1) W. Rogowski, W. Grösser, Arch. F. Elektrotechnik, XV Bd. 4. Heft, S. 377, 1925

2) K. H. Steigerwald, Optik 5, S. 469, 1949

3) F. W. Braucks, Optik 15, Heft 4, S. 242, 1958

4) F. W. Braucks, Optik 16, Heft 5, S. 304, 1959

5) W. Glaser, Z. Physik, S. 285, 1941

6) G. Liebmann, E. M. Grad, Proc. Phys. Soc. B 64, 956, 1951

7) B. v. Borries, F. Lenz, G. Opfer, Optik 10, S. 132, 1953

8) B. V. Borries, E. Ruska, Z. f. Techn. Physik 20, S. 225, 1939

9) F. Lenz, Habilitationsschrift, Rhein.-Westf. Techn. Hochschule Aachen 1957

10) E. Ruska, s. Boersch, Born, 4. Int. Kongr. f. Elektr. Mikr. Berlin 1958, Bd. 1, S. 35, 1960

11) F. Kohlrausch, Prakt. Physik, Bd. 1, 22. Aufl. 1968

12) W. Scheffels, 11. Tagung der Dt. Gesellschaft f. Elektr. Mikr., Zürich 1963

13) D. B. Langmuir, Proc. I. R. E. 25, Nr. 8, S. 977, 1937

14) C. Herring, M. H. Nichols, Revs., Modern Phys. 21, S. 185, 1949

Lebenslauf von Hans Hoffmann

Geboren am 7. Febr. 1937 in St. Ingbert/Saar. Von 1947 bis 1956 Besuch des dortigen Staatlichen Realgymnasiums.

Ab Mai 1956 Studium an der Universität Saarbrücken mit Physik als Hauptfach ab dem 2. Semester.

Ab November 1957 Studium an der Universität Tübingen, Ablegen der Diplomvorprüfung im Juli 1959.

Im Mai 1960 Beginn der Diplomarbeit im Institut für Angewandte Physik unter der Leitung von Prof. Dr. Ing. habil. G. Möllenstedt, mittels eines Elektroneninterferometers Untersuchungen des "Einfluß von Aufladungen auf die Stromdichteverteilung im Elektronenschattenbild dünner Folien" (Optik 21, 432, 1964) und "Messungen des mittleren inneren Potentials von Beryllium und Al, Cu, Ge" (Physik der Kondensierten Materie 3, 193, 1965 und Z. Physik 182, 360, 1965).

Im Juni 1965 Ablegen der mündlichen Diplomhauptprüfung.

Ab September 1965 Angestellter am oben genannten Institut, zunächst Untersuchungen der Richtstrahlwerte des Siemens Elmiskops.

Im September 1966 Eheschließung mit Helga Schaefer.

Ab Oktober 1966 Aufbau eines elektronenoptischen Versuchsgeräts und damit "Richtstrahlwertmessungen an Hochleistungselektronenstrahlern von 125 kV und 1 mA".

Akademische Lehrer: die Herren Professoren G. Pickert, H. Kneser, M. Müller, H. Krüger, G. Möllenstedt, F. Lenz, W. Braunbek, W. Rüdorff, G. Kortüm.